

## AFPM BLDC 전동기의 인가전압의 위상변화에 대한 특성해석

이정열<sup>0</sup> 오철수

경북대학교 전기공학과

### Characteristics Analysis of AFPM BLDC Motor Using Advance Angle Manipulation

Jung-Yeol Lee Chui-Soo Oh

Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat' Univ.

#### Abstract

This paper deals with the torque characteristic of AFPM Brushless DC motor, which is driven by 3 phase inverter and with the effect of phase of input voltage to the output by varying the input voltage to the induced voltage in stator of motor. To accomplish this, a prototype AFPM Brushless DC Motor was produced and phase variation was detected by a set of photo interrupter. In this realized system, method to maximize the output torque depend on the speed of motor is presented.

#### 1. 서론

Brushless DC 전동기는 Brush를 가진 DC 전동기에 비해 전기적, 기계적 노이즈가 적고 신뢰성이 높고 장수명을 가지므로 최근 그 용도가 점차 증가하고 있다.

일반적 형태의 Brushless DC 전동기는 공극단면이 축과 평행한 방향으로 놓여져, 이 공극에서 고정자 코일과 회전자 자속의 상호작용으로 토크가 형성된다. AFPM Brushless DC 전동기는 공극단면이 축과 직교하므로 축과 평행한 방향의 자속, 즉 Axial Flux에 의하여 토크가 형성된다. 이러한 형태의 전동기는 축방향 길이가 짧고, 회전자와 고정자가 disc type으로 되어 납작한 slim type의 구조가 가능하게 된다. 이러한 구조적 장점으로 인하여 단위 무게당 출력을 일반적인 형태의 전동기보다 높게 설계할 수 있다. 또한 영구자석 재료도 Ferrite, Alnico, Nd-Fe-B와 같은 고에너지 밀도를 가지는 영구자석의 개발이 성과를 거두므로 인하여 고효율 및 고출력을 내는 것이 가능해졌다.

일반적으로 Brushless DC motor drive는 일정한 DC 공급전압에 의하여 동작한다. 이러한 동작조건에서 전동기의 회전속도가 증가함에 따라서 torque는 감소하는

특성을 볼 수 있다. 본 연구에서 대상으로 삼은 AFPM Brushless DC 전동기에서는 torque를 최대로 하기 위해서는 유기기전력과 고정자의 상전류의 위상차를 조절하여야 한다. 이를 위해 유기기전력에 대한 인가전압의 위상을 조절함으로서 출력토크를 최대로 할 수 있는 방법을 제시하였다.

#### 2. AFPM의 구조

본 연구에 사용된 AFPM Brushless DC 전동기의 형태는 그림 1(c)와 같다. 전동기의 고정자의 형태는 그림 1(a)에서처럼 토러스 형의 철심에 3상 권선이 Toroidal 형으로 감겨져 있다. 고정자가 slotless 형태로 되어 있으므로 cogging torque를 줄이고 회전자의 진동에 의한 부가적인 손실과 노이즈를 줄일 수 있다. 그림 1(b)에서처럼 고정자의 양축에 있는 두 개의 회전자는 disc type으로 축방향으로 착자된 영구자석이 부착되어 마주 보

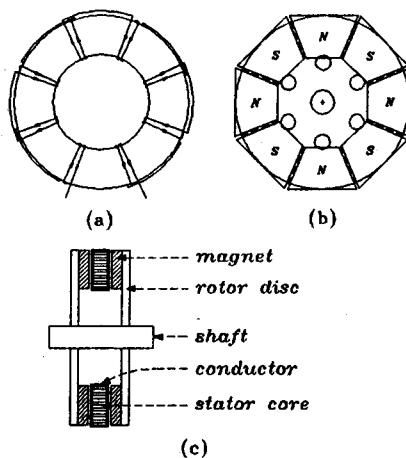


그림 1. AFPM BLDC 전동기의 구조

는 두 원판에 같은 극이 위치하도록 축에 고정되어 있다. 이러한 형태의 디자인은 고정자 권선의 양면을 이용하므로 회전자 자속과 고정자 권선의 상호작용에 의한 출력이 크다. 또한 고정자 권선의 동순에 의하여 생성되는 열을 냉각하기가 쉽고, 공극의 길이의 조절이 쉽다는 장점이 있다.

이 전동기의 구동은 그림 2에서처럼 3상 전압형 인버터를 사용하였다. 인버터의 스위칭 소자로는 IRFP250 MOSFET를 사용하고 회전자의 위치검출은 Photo Interrupter를 사용하여 위치신호를 조합하여 MOSFET의 gate 신호로 사용하였다.

표 1에 본 연구에 사용된 전동기의 사양을 나타내었다.

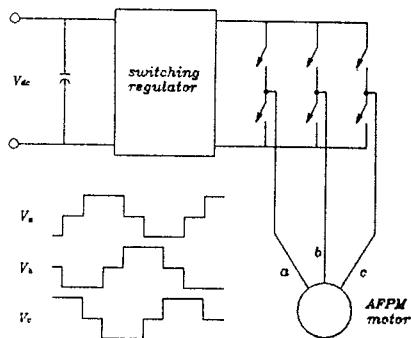


그림 2. 전동기 구동용 인버터 회로

표 1. 제작된 AFPM 전동기의 사양

|          |       |
|----------|-------|
| 극수       | 8극    |
| 상수       | 3상    |
| 정격출력     | 200W  |
| 정격전류     | 6.7A  |
| 고정자 저항   | 0.21Ω |
| 고정자 인덕턴스 | 4.2mH |

### 3. AFPM 전동기의 토크 제어

#### 3.1 AFPM 전동기의 토크 및 유기기전력

AFPM brushless DC 전동기의 토크는 고정자 권선의 전류(Electric loading  $J$ ) 즉 총권선 MMF를 내경의 길이로 나눈 선기자력 밀도)와 회전자의 영구자석의 동작점의 자속 간의 상호작용에 의하여 식 (1)과 같이 주어지며 유기기전력은 식 (2)와 같이 주어진다.<sup>[1][2]</sup>

$$T = 2\pi K_p B_{av} J R_i (R_o^2 - R_i^2) \quad (1)$$

$$E = 2\pi \omega N_p P K_p B_{av} (R_o^2 - R_i^2) \quad (2)$$

$\omega$  : 전동기의 회전각속도

$P$  : 극수

$N_p$  : 상당극당 권선수

$K_p$  : 고정자 권선과 영구자석의 쇄교자속비

$B_{ave}$  : 영구자석의 공극평균자속밀도

$J$  : 고정자 권선의 내경에서의 electric loading

$R_i$  : 고정자 내경

$R_o$  : 고정자 외경

식 (1)에서 전동기의 최대토크는 고정자 권선과 자속의 쇄교비, 공극의 자속밀도, 고정자 권선에 흐르는 전류에 의한 electric loading  $J$ , 고정자의 내경과 외경의 크기에 의하여 결정되는 것을 알 수 있다.

### 3.2 고속동작영역에서의 토크제어

일반적으로 인가전압과 유기기전력이 같은 상태에서의 회전속도 이상으로 전동기의 속도영역을 확대할 수는 없다. 그러나 계자권선을 이용한 brush를 가진 DC 전동기의 경우에는 이러한 문제는 계자전류를 감소시켜 계자자속을 감소시키는 Field-Weakening 방법에 의하여 정격속도 이상의 속도로 운전이 가능하다. 그러나 AFPM Brushless DC 전동기는 계자가 영구자석으로 이루어져 있으므로 이러한 방법을 적용할 수 없으나 전류와 유기기전력 사이의 위상을 조절함으로서 정격속도 이상으로 운전이 가능하다.

저속의 동작영역에서는 고정자 권선의 리액턴스 성분에 의한 전압강하는 크지 않으므로 권선의 저항에 의한 전압강하만이 영향을 미친다. 따라서 인가전압과 유기기전력의 차이는 크지 않고 전압과 상전류의 위상차 또한 크지 않다.

하지만 고속의 동작영역에서는 고정자 권선의 리액턴스에 의하여 인가전압과 전류에 위상차가 발생한다. 따라서 이 영역에서는 유기기전력과 전류 사이의 위상차

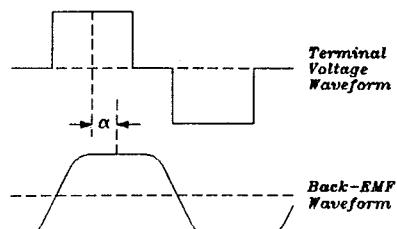


그림 3. 전동기의 인가전압과 유기기전력의 과형과 advance angle  $\alpha$

에 의해서 출력토크가 감소한다. 이러한 고속동작영역의 경우에는 그림 3에서 볼 수 있듯이 인가전압과 유기기 전력의 위상차, 즉 advance angle  $\alpha$ 를 크게 함으로서 유기기전력과 상전류 사이의 위상각의 차이를 감소시킬 수 있고 이에 의해서 출력토크의 특성을 개선할 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

그림 4는 속도에 대한 토크의 특성을 나타내고 있다. advance angle  $\alpha$ 의 변화에 따라 서로 다른 토크 특성을 보여 주고 있다. 즉 무부하 속도는  $\alpha$ 가 증가함에 따라 올릴 수 있고, 기 기울기는 거의 변동이 없음을 알 수 있었다. 예를 들면 1.0Nm의 토크출력을 나타내는 속도의 범위는  $\alpha$ 를 0°에서 45°로 증가시킴에 따라 1500rpm에서 2100rpm으로 증가될 수 있음을 보여주며 출력도 상대적으로 증가됨을 알 수 있다. 그림 5에서는 각 상의 전류당 토크에 대한 속도를 보여주고 있다. 각각의 속도에서  $\alpha$ 에 따라 얻을 수 있는 전류당 토크의 값이 다르다는 것을 알 수 있다. 이 값이 클수록 적은

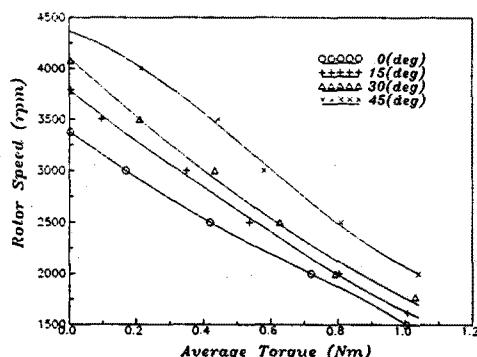


그림 4. advance angle  $\alpha$ 에 따른 토크-속도 곡선

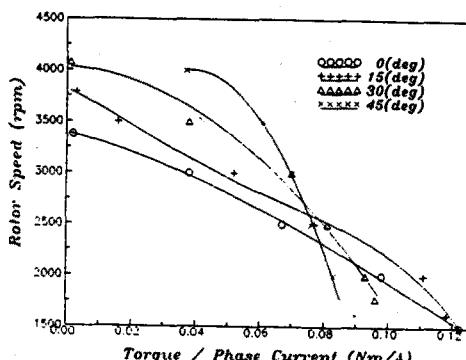


그림 5. advance angle  $\alpha$ 에 따른 토크/전류-속도곡선

전류로 높은 속도를 얻을 수 있으며 기계효율이 높아진다고 볼 수 있다. 예를 들면 2000rpm의 동작속도에서는  $\alpha=15^\circ$ 에서 전류당 0.12Nm의 토크를 얻을 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 AFPM Brushless DC 전동기의 인가전압의 위상조절에 의한 토크 특성을 분석하였다. 전동기의 advance angle  $\alpha$ 를 변화시킴으로서 전동기의 운전특성이 달라짐을 확인하였다. 즉  $\alpha$ 가 증가함에 따라 전동기의 운전영역이 연장되고 토크 특성 또한 개선됨을 알 수 있었다. 하지만  $\alpha$ 를 크게 했을 경우 전동기의 고정자 전류가 증가하므로 이로 인하여 발생되는 열에 대한 고려가 필요하리라 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] E. Spooner, B. J. Chalmers, "Toroidally-Wound, Slotless, Axial-Flux, Permanent-magnet brushless dc motors", Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 1988, Vol III, pp. 81-86
- [2] E. Spooner, B. J. Chalmers, "TORUS : A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator", IEE Proceeding-B, Vol. 139, No. 6, 1992.
- [3] E. Spooner, B. J. Chalmers, "Motoring Performance of the Toroidal Permanent-Magnet Machine TORUS", Proc. IEE 5th International Conference on Electrical Machines and Drives, 1991, pp. 36-40
- [4] Chris C. Jensen, et. al, "A Low-Loss Permanent -Magnet Brushless dc Motor Utilizing Tape Wound Amorphous Iron", IEEE Trans. Vol. 28, NO. 3, 1992, pp. 646-651
- [5] Thomas m. Jahns, "Torque Production in Permanent -Magnet Synchronous Motor Drives with Rectangular Current Excitation", IEEE Trans. Vol. IA-20, No4, 1984, pp. 803-813.
- [6] S. K. Safi, P. P. Acarnley, A. G. Jack, "Analysis and Simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 142, No. 3, May 1995
- [7] S. A. Nasar, I. Boldea, L. E. Unnewehr, "Permanent Magnet, Reluctance, and Self -Synchronous Motors", CRC Press, 1993